

УДК 550.380; 551.508

## АНОМАЛЬНЫЕ ПЯТИСУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ НАД СЕЙСМООПАСНЫМИ РЕГИОНАМИ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ КОРОВЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

А.В. Тертышников, А.А. Важенин

Приведены оценки аномальных пятисуточных вариаций оптической толщины атмосферы над сейсмоопасными регионами перед 30 сильными коровыми землетрясениями суши.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА АТМОСФЕРЫ, ПРЕДВЕСТНИК, ПРОГНОЗ.

### ВВЕДЕНИЕ

В проявлении предвестников сильных коровых землетрясений (наиболее опасных по критерию ущерба и жертв) часто фиксируется уникальная заблаговременность, кратная 5 суткам [1]. Проявление этой закономерности можно исследовать в характеристиках оптической толщины атмосферы (десятичный логарифм отношения падающего потока излучения к потоку, прошедшему через всю толщу атмосферы:  $D = \lg P_0/P$ ).

Изменения оптической толщины атмосферы (АОТ) перед сильными землетрясениями были впервые оценены в [1]. При объяснении этих эффектов использовались зарегистрированные изменения радиационного баланса сейсмотектонической аномалии (СТА), приземного электрического поля и выход подземных газов.

В настоящее время АОТ регистрируют по интенсивности излучения неба и Солнца по программе наземных дистанционных радиометрических наблюдений за солнечным излучением и содержанием аэрозолей в атмосфере (AERONET) [<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>]. Успешно функционирует всемирная наблюдательная сеть автоматизированных радиометров. В Интернете представлены данные наблюдений за оптической толщиной атмосферы по 8 длинам волн: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 нм с более 460 станций сети AERONET.

Данные измерений радиометров сети AERONET через систему сбора данных передаются на один из трех геостационарных спутников: GOES, METEOSAT или GMS, а

затем ретранслируются на наземные приемные станции. Возможна передача данных измерений с прибора через интернет или радиомодем в режиме реального времени.

### МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ

Упорядочивание структуры напряжений и деформаций сейсмотектонической аномалии перед землетрясением проявляется в морфологии гидрогеологических, геохимических и электромагнитных эффектов. За несколько суток до землетрясений фиксируются существенные изменения в интенсивности потока подземных газов и ионизации атмосферы над СТА, особенно над границами отдельных блоков, меняется аэрозольный состав ионосферы. Формируется нескомпенсированный электрический заряд над СТА [1], который влияет на ориентацию аэрозольных частиц и дипольных молекул водяного пара в воздухе.

Заблаговременность проявления предвестников зависит от масштаба землетрясения. Краткосрочные предвестниковые возмущения геофизических полей особенно резко проявляются в области СТА за несколько суток до сильных коровых землетрясений. Однако на фоне протяженных масштабов СТА и при отсутствии регулярных сетевых наблюдений проявление краткосрочных предвестников переходит в категорию псевдослучайных.

Исходя из потенциальных механизмов взаимодействия геосфер (волнового и электромагнитного), физически обосновано проявление предвестниковых эффектов в атмосфере непосредственно над СТА и со значительно меньшей интенсивностью на значительных

удалениях от СТА. К моменту землетрясения проявление краткосрочных предвестников стягивается к эпицентральной зоне землетрясения [1].

Следует отметить сложное проявление взаимосвязи возмущений геофизических полей. Изменение напряженно-деформированного состояния СТА проявляется в характеристиках радиационного баланса, влажности и прозрачности приземного и пограничного слоев атмосферы. В эти характеристики вносит свой вклад увеличение потока подземных газов и повышенная напряженность электрического поля над СТА.

Электрическое поле влияет на ориентацию заряженных частиц и электрооптические свойства атмосферы. Под действием сейсмогенных электромагнитных полей СТА происходит укрупнение частиц атмосферного аэрозоля, что отражается в метеорологической дальности видимости и АОТ.

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Обобщенный портрет краткосрочного предвестника сейсмической опасности в характеристиках прозрачности атмосферы рассчитывается с помощью метода «наложения эпох» [1-3] для данных наблюдений сети AERONET вблизи от нескольких сильных коровых землетрясений.

Для диагностики предвестников в качестве примера можно использовать данные наблюдений по одной длине волны, например, 340 нм.

В таблице 1 представлены землетрясения, использованные в дальнейшем анализе. Характеристики землетрясений взяты из [earthquake.usgs.gov].

Ряды данных наблюдений о величине АОТ ограничивались продолжительностью  $\pm 30$  суток от момента землетрясения. Станции наблюдений сети AERONET выбирались как можно ближе к эпицентрам землетрясений.

Для повышения однородности анализируемых данных проводилось нормирование значений АОТ в интервале от 1 до 2. Единица соответствовала минимальному значению в

анализируемом 30-суточном ряде наблюдений, а двойка – максимальному. На основе нормированных рядов исследовались статистические характеристики обобщенного портрета вариаций АОТ.

Сейсмогенные эффекты проявляются в виде шумов на фоне естественных вариаций характеристик геофизических полей. Поэтому при диагностике предвестниковых эффектов основное внимание целесообразно уделять не первым двум моментам распределения анализируемых характеристик, а периодограммам мощности их вариаций.

Проверка гипотезы о заблаговременном аномальном увеличении значения АОТ перед землетрясением целесообразно провести для уровня значимости с  $p \leq 0,05$ .

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Периодограммы мощности вариаций нормированных 30-суточных рядов с оценками оптической толщины атмосферы рассчитывались для каждого из 30-ти землетрясений. Амплитудные спектры рассчитывались в скользящем окне шириной 10 суток (начальная заблаговременность -30...-21 сутки до землетрясения – на графике -30\|-21 и т.д.) с помощью простого преобразования Фурье.

Обобщенная спектрограмма оценок математического ожидания анализируемых гармоник представлена на рис. 1.

В спектре мощности вариаций анализируемых характеристик отчетливо проявилась многомодовая структура, характерная для эволюции нелинейных динамических систем.

Аномальность рассчитанных оценок мощности каждого анализируемого периода оценивалась путем сравнения с фоновыми оценками по двухвыборочному критерию Колмогорова-Смирнова. Для расчета фоновых периодограмм использовались 30-суточные отрезки нормированных данных наблюдений за АОТ после землетрясений.

Таблица 1. Характеристики использованных землетрясений.

Дата	Магнитуда землетрясения	Глубина, км	Координаты эпицентра	Расстояние до ближайшей станции, км	Станция AERONET
14.08.2003	6.3	10	38.83C 20.57B	252	LECCE_UNIVERSITY
08.06.2008	6.4	16	37.96C 21.52B	202	ATHENS-NOA
15.07.2008	6.4	52	35.80C 27.86B	258	FORTH_CRETE
01.07.2009	6.4	19	34.16C 25.47B	130	FORTH_CRETE
17.03.2004	6.1	25	34.59C 23.33B	185	FORTH_CRETE
14.02.2008	6.9	29	36.50C 21.67B	335	FORTH_CRETE
6.01.2008	6.2	75	37.22C 22.69B	300	FORTH_CRETE
8.01.2006	6.7	66	36.31C 23.21B	122	FORTH_CRETE
19.06.2009	5.8	28	35.36C 28.45B	300	FORTH_CRETE
8.06.2008	6.4	16	37.58C 21.31B	195	ATHENS-NOA
26.10.2006	5.8	212	38.39C 15.22B	55	MESSINA
4.07.2007	5.2	279	38.47C 15.12B	130	ETNA
9.10.2010	5.1	10	38.10C 22.44B	92	ATHENS-NOA
11.04.2010	6.3	609	36.57C 03.033	24	GRANADA
6.04.2009	6.3	8	42.20C 15.13B	81	ROME_TOR_VERGATA
14.05.2010	5.2	2	35.90C 4.12B	130	BLIDA
17.06.2009	5	10	36.03C 37.26B	170	IMS-METU-ERDEMLI
28.03.2008	5.6	45	34.45C 26.30B	64	FORTH_CRETE
11.05.2011	5.1	1	37.42C 02.263	182	GRANADA
3.08.2010	5.4	24	38.22C 70.50B	72	DUSHANBE
13.11.2009	6.5	27	19.23Ю 69.103	103	ARICA
21.08.2006	5.5	411	33.37C 136.17B	44	SHIRAHAMA
15.04.2007	5.1	16	34.48C 136.45B	61	OSAKA
1.06.2008	5.3	94	24.50C 122.01B	40	TAIPEI_CWB
11.08.2010	5.4	37	07.29Ю 103.34B	90	BANDUNG
24.12.2010	5	103	18.15C 65.403	57	CAPE_SAN_JUAN
20.05.2009	5	19	19.0C 65.293	70	CAPE_SAN_JUAN
16.05.2010	5.8	113	18.24C 67.043	47	LA_PARGUERA
12.02.2008	6.5	83	16.22C 94.183	130	TUXTLA_GUTIERREZ
9.10.2007	5	19	42.56C 80.42B	80	ISSYK-KUL

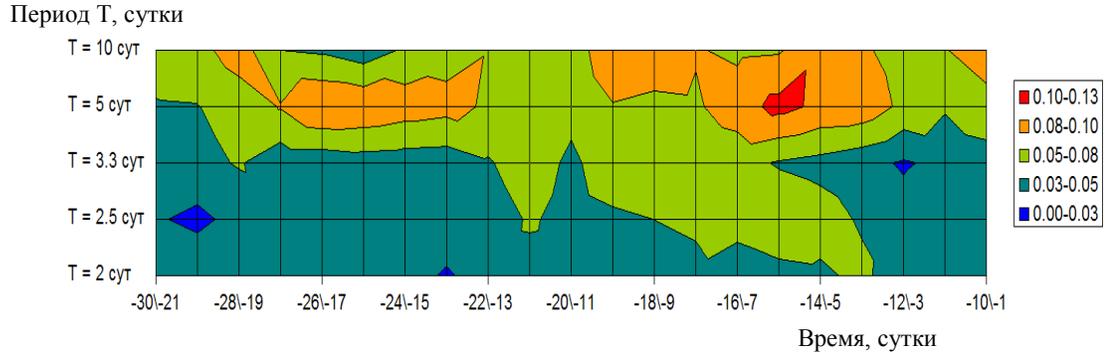


Рис. 1. Обобщенная спектрограмма оценок математического ожидания основных гармоник в вариациях нормированных характеристик оптической толщины атмосферы перед обобщенным землетрясением.

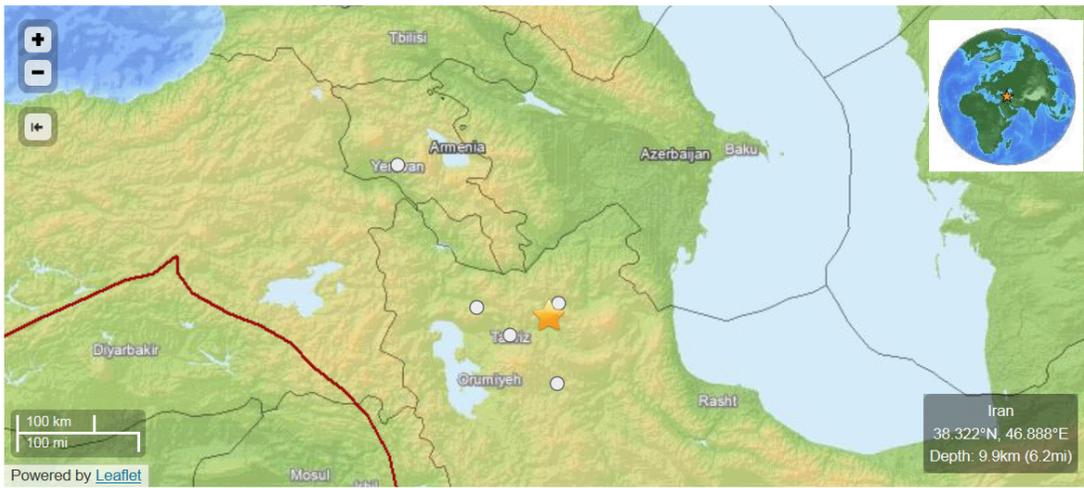


Рис. 2. Положение эпицентра Иранского землетрясения 11.08.2012 г. Наблюдения на ближайшей к эпицентру станции сети AERONET «IASBS» (36° 42' с.ш. 48° 30' в.д.) достаточно полно характеризуют изменение АОТ (рис. 3).

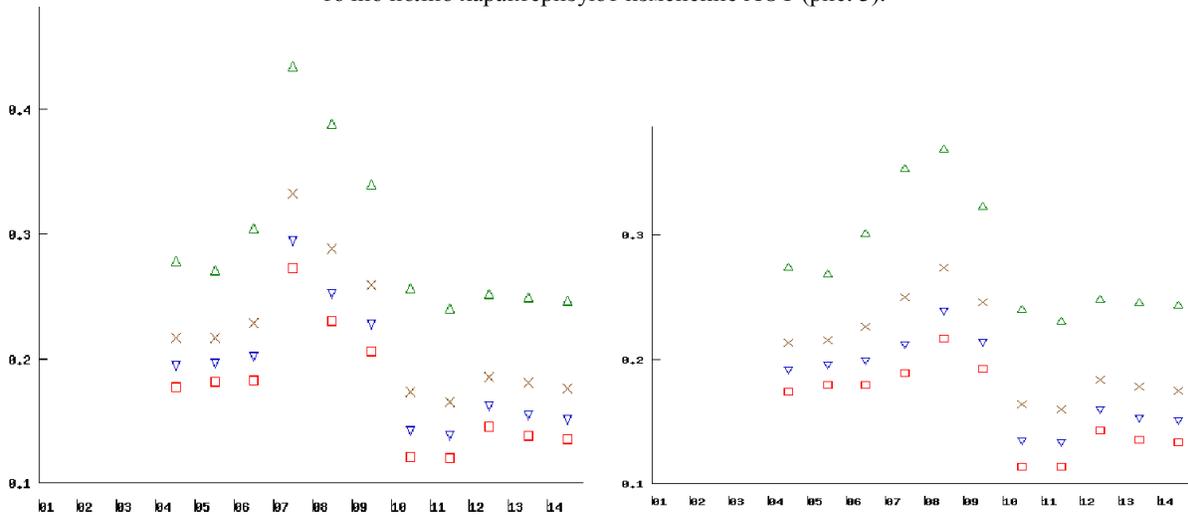


Рис. 3. Среднесуточные значения оптической толщины атмосферы на станции IASBS в августе 2012 г. с различными уровнями (качеством) измерений (слева 1,0, справа 1,5). Зеленые треугольники для длины волны 440 нм, синие – 870 нм, коричневые х – 675 нм, красные квадраты – 1020 нм.

В результате сравнения было получено статистически значимое различие по двухвыборочному критерию Колмогорова-Смирнова оценок мощности периодов  $T=5$  суток ( $p<0,01$ ),  $T=11$  суток ( $p<0,10$ ),  $T=13$  суток ( $p<0,025$ ),  $T=15$  суток ( $p<0,001$ ),  $T=20$  суток ( $p<0,001$ ),  $T=28$  суток ( $p<0,001$ ),  $T=29$  суток ( $p<0,01$ ),  $T=30$  суток ( $p<0,005$ ).

Если в качестве фона использовать 30-суточные отрезки нормированных данных наблюдений с выбранной случайным образом начальной границей, то только 3 периода оказываются пригодными для диагностики предвестников сейсмической опасности:  $T=3$  суток ( $p<0,01$ ),  $T=5$  суток ( $p<0,025$ ),  $T=10$  суток ( $p<0,005$ ).

Полученные результаты аномальных пятисуточных вариаций АОТ перед сильными коровыми землетрясениями являются основой для создания технологий мониторинга сейсмической опасности.

Зависимость величины АОТ от расстояния между точкой наблюдения и эпицентром землетрясения получить не удалось.

Пример для Иранского землетрясения 11.08.2012 г.

В Иране 11.08.2012 г. недалеко от г. Ahar (23km SW) в 12:23:17 UTC произошло сильное землетрясение (рис. 2) с  $M=6.4$  с глубиной гипоцентра око-

ло 10 км. Было много жертв.

Аномальная амплитуда выброса 7.08.2012 г. за четверо суток до землетрясения в течение суток достигала значений 1,5. При этом увеличились многосуточные вариации АОТ.

Выброс 7.08.2012 г. АОТ на станции IASBS мог быть обусловлен возмущением магнитного поля Земли (рис. 4).

Однако на станции Душанбе всплесков в характеристиках АОТ не зафиксировано (рис. 5). В данных наблюдений станции Душанбе не прослеживается выброс 7.08.2012 г. на станции IASBS.

Следует отметить пониженные значения АОТ в почти десятидневной волне изменчивости данных наблюдений. Подобные минимумы АОТ наблюдаются перед землетрясением и на станции IASBS.

В наблюдениях характеристик аэрозолей подтвердился эффект укрупнения размеров частиц аэрозолей перед землетрясением. Возможно, под влиянием сейсмогенных электрических полей на ориентацию заряженных частиц и электрооптические свойства атмосферы.

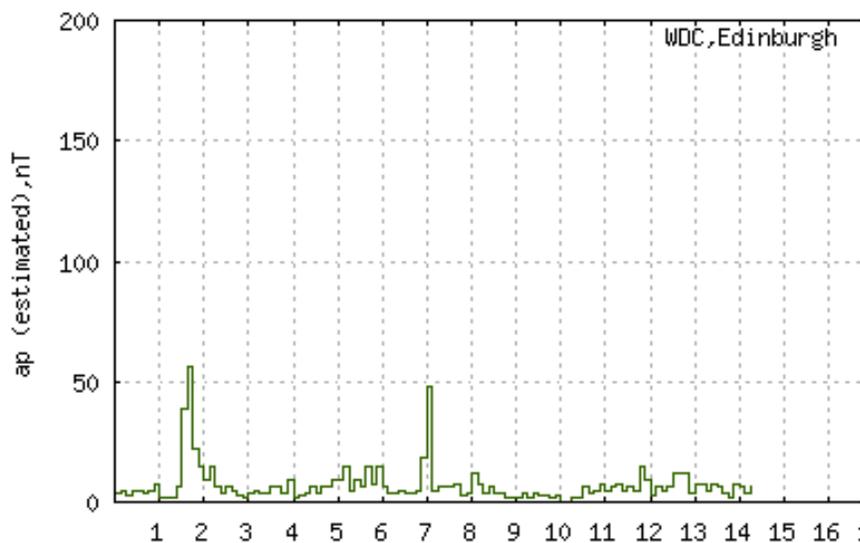


Рис. 4. Изменение ап-индекса в августе 2012 г.

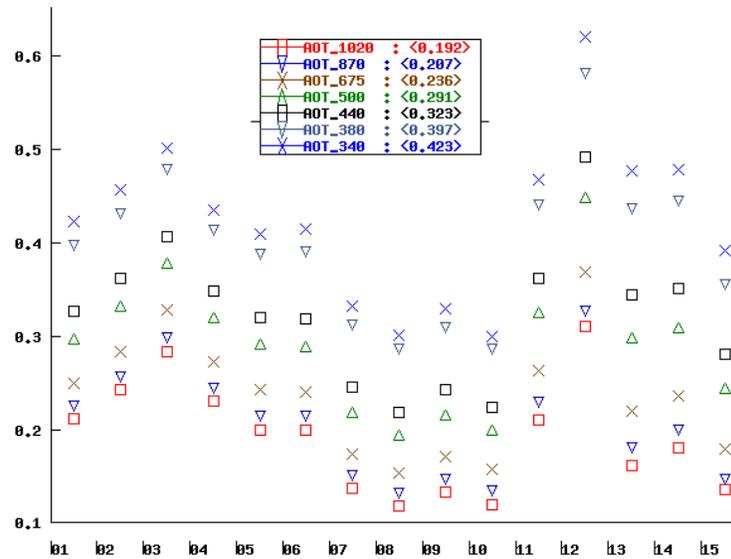


Рис. 5. Изменение оптической толщины атмосферы на станции Душанбе в августе 2012 г. (уровень осреднения 1,0).

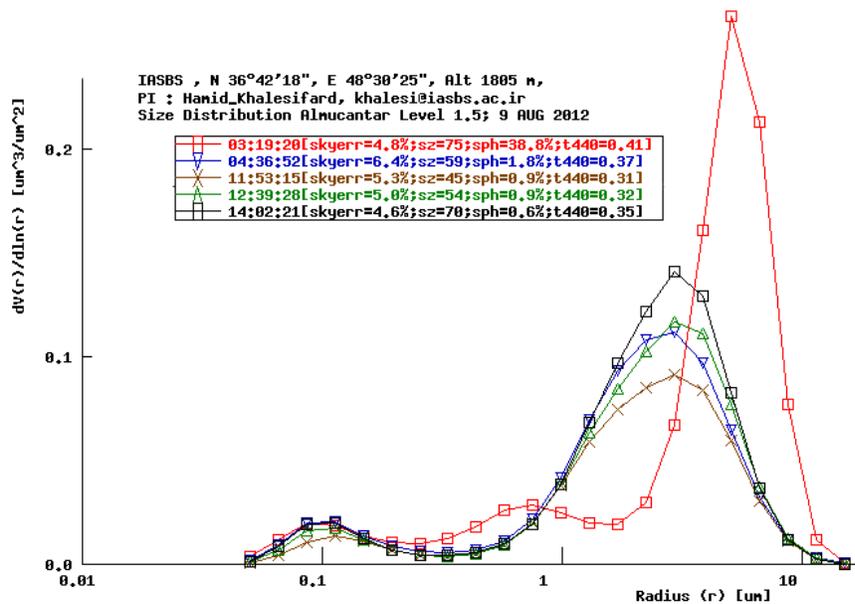


Рис. 6. Характеристики аэрозолей в атмосфере на станции IASBS 9.08.2012 г.

Укрупнение частиц аэрозолей и повышение их концентрации (рис. 6) зафиксировано с 8.08.2012 г. (в полтора раза) с максимумом 9.08.2012 г. (в 2-3 раза).

10.08.2012 г. концентрация аэрозолей возвращается к фоновым значениям, но размеры остаются повышенными в 1,5-2,0 раза.

На станции Душанбе подобных эффектов не зафиксировано. К землетрясению концентрация крупных частиц аэрозоля, наоборот, уменьшается, что может соответствовать отсутствию сейсмогенных квазистационарных

электрических полей. Вариаций в концентрации частиц с меньшими размерами не выявлено.

## ВЫВОДЫ.

Над сейсмоопасными регионами перед сильными коровыми землетрясениями выявлены аномальные пятисуточные вариации оптической толщины атмосферы.

В спектре мощности вариаций анализируемых характеристик отчетливо проявилась

многомодовая структура, характерная для эволюции нелинейных динамических систем.

Отмечено укрупнение размеров частиц и всплески концентрации аэрозолей перед землетрясением, что может быть обусловлено влиянием сейсмогенных электрических полей.

Полученные результаты являются основой для создания технологии мониторинга сейсмической опасности по данным сетевых наблю-

дений за прозрачностью атмосферы, в том числе с использованием лидаров, чтобы снизить влияние облачности на проведение наблюдений.

#### **Благодарности**

Авторы благодарят И.А. Юдина за помощь в проведении расчетов и С.А. Пулинца за полезные дискуссии.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Тertyшников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000. 304 с.
2. Тertyшников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва, 2011. 261 с.
3. Тertyшников А.В. Организация прогнозирования природных чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва, 2011. 268 с.